第65卷 第2期 天 文 学 报 Vol. 65 No. 2
2024年3月 ACTA ASTRONOMICA SINICA Mar., 2024

doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2024.02.009

年轻脉冲星周期–磁场分类及演化*

余 竞† 王德华 孙益洪 周云刚

(贵州师范大学物理与电子科学学院 贵阳 550025)

摘要 年轻脉冲星多处于超新星遗迹(Supernova Remnant, SNR)中, 其分为转动供能脉冲星(Rotation-powered SNR-PSR)、磁星(Magnetar)和中心致密天体(Central Compact Object, CCO), 这3类年轻脉冲星有着不同的自旋周期及磁场强度分布. 其中, 遗迹磁星(SNR-Magnetar)的平均自旋周期比转动供能遗迹脉冲星大近一个量级, 平均磁场强度高近两个量级. 同时, 中心致密天体比转动供能遗迹脉冲星的平均磁场强度低近两个量级. 这3类年轻脉冲星不同的物理性质, 可能源于其不同的前身星或不同的超新星爆发过程, 也可能源于其中子星诞生后的不同演化过程. 此外, 转动供能遗迹脉冲星比年轻的转动供能非遗迹脉冲星具有更快的平均自旋周期、更大的平均磁场强度和更短的平均特征年龄. 这暗示新诞生的中子星经时间约为10^5–10^6 yr的演化过程, 其自旋速度将减小近一半, 同时其磁场强度也将衰减近一半.

关键词 **脉冲星: 普通, 恒星: 中子, 超新星遗迹**

中图分类号: P144; **文献标识码**: A

1 引言

超新星爆发是大质量恒星演化晚期因核心能源耗尽而发生的爆发现象, 期间星体抛出物膨胀形成的星云状残骸称作超新星遗迹(Supernova Remnant, SNR)[1]. 恒星经超新星爆发后会剩下一颗致密天体, 如前身星是8–25 $M_\odot$ ($M_\odot$表示一个太阳质量)的恒星经II型超新星爆发后会形成一颗中子星[2]. 此外, 一般认为超新星爆发形成中子星的途径为核塌缩过程(核塌缩超新星)或电子捕获过程(电子捕获超新星)[1, 3]. 通常理论认为, 观测到的脉冲星就是理论预言的中子星, 其灯塔状的辐射束随星体自转扫过地球时, 会被观测为周期性的射电脉冲[4]. 自从脉冲星被发现后, 陆续的观测在蟹状星云(Crab Nebula)[5]、船帆座[6]等SNR中发现了脉冲星, 进一步验证了中子星的超新星起源. 此外, 学术界曾预言在SN1987A中可能存在一颗脉冲星, 但至今还未找到这颗脉冲星[7–9], 曾有学者用阿塔卡玛大型毫米波天线阵(Atacama Large Millimeter Array, ALMA)在SN1987A的观测中检测到类似于脉冲星风云的特征, 并认为这可能是该遗迹存在脉冲星的证据[8]. 目前银河系已发现约383个超新星遗迹[10]以及4000多颗脉冲星[11], 其中包括中国天眼(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST)发现的740多颗射电脉冲星, 这得益于FAST较宽的天区覆盖[12]、频带范围(70 MHz–3 GHz)[13]以及较高的灵敏度[14]. 在已发现的超新星遗迹中, 与脉冲星成协的有近100颗, 即超新星遗迹脉冲星(简称遗迹脉冲星或SNR-PSR)[15]. 值得注意的是, 约3/4的超新星遗迹中并未探测到脉冲星, 其可能是这些超新星爆发并未

2023-01-16收到原稿, 2023-03-16收到修改稿

*国家自然科学基金项目(12163001、U1938117), 贵州省科学技术基金项目(黔科合基础[2020]1Y016)资助

†2692661859@qq.com

形成中子星[16–19], 亦或是一些年轻脉冲星的射电信号太微弱而无法被观测到[20–21], 再或是形成的脉冲星具有很大的反冲速度而早已逃离所在超新星遗迹[22].

超新星遗迹脉冲星是一类年轻源, 其中大多是转动供能脉冲星, 此外也包括内部供能脉冲星, 如磁星(Magnetar)和中心致密天体(Central Compact Object, CCO), 这两类源爆发时的光度大于星体自转能损率($\dot{E}$). 磁星是一类具有超强磁场的孤立中子星, 分为反常X射线脉冲星(Anomalous X-ray Pulsars)和软伽马射线重复暴(Soft Gamma-ray Repeaters)[2, 23–24]. 观测上磁星表现为剧烈的X射线或软γ射线爆发, 而通常理论认为这些爆发起源于磁星内部强磁场的衰减过程[25–29]. 磁星的自旋周期(P)范围在0.3–12 s, 表面磁场强度(B)范围在10^{13}–10^{15} Gs, 它们大多分布在银盘附近, 且约1/3的磁星与超新星遗迹成协[30]. 磁星曾观测到多种高能爆发现象, 如持续时间从几毫秒到几秒的短爆(burst), 其峰值光度约为10^{36}–10^{43} $\mathrm{erg \cdot s^{-1}}$[2, 30]; 又如持续时间更长的爆发(outburst), 其爆发初期辐射流量显著增加($\sim$10–1000倍), 而后在几个月至几年的时间里逐渐衰减, 期间伴随自旋周期突然加速(glitch)现象[29–30]; 再如峰值光度为10^{44}–10^{47} $\mathrm{erg \cdot s^{-1}}$的巨型闪耀(giant flare)[30–32]. 近些年, 有关磁星发现了一些新现象, 也提出了一些新观点, 如观测发现了低磁磁星($B \sim 10^{12}$–10^{13} Gs, 如SGR 0418+5729和3XMM J185246.6+003317[33–34]), 又如在一些高磁场射电脉冲星(PSR J1846-0258和PSR J1119-6127[29])中观测到类似磁星的爆发, 再如有观点认为高磁场的暗X射线孤立中子星(X-ray-dim isolated neutron stars)[35]可能与磁星存在演化关系. 中心致密天体是一类在超新星遗迹中发现的孤立致密天体[36–37]. 这些源只发射软X射线辐射, 能谱呈现典型的黑体谱, 温度在0.2–0.5 keV[38], 辐射区域半径约为0.3–3 km. 目前观测已发现10颗中心致密天体, 它们全部位于超新星遗迹中心附近, 且未发现脉冲星风云. 在这10颗源中有3颗中心致密天体测量到自旋周期和周期导数[39–40]: (1) RX J0822.0-4300, $P \sim 112$ ms, $B \sim 2.9 \times 10^{10}$ Gs, 所在遗迹年龄(τ_{SNR}) $\sim$ 4.5 kyr[41–42]; (2) 1E 1207.4-5209, $P \sim 424$ ms, $B \sim 9.8 \times 10^{10}$ Gs, $\tau_{\mathrm{SNR}} \sim$ 7 kyr[43–47]; (3) CXOU J185238.6+004020, $P \sim 105$ ms, $B \sim 3.1 \times 10^{10}$ Gs, $\tau_{\mathrm{SNR}} \sim$ 7 kyr[48–50]. 中心致密天体具有相对较低的偶极磁场强度($\sim 10^{10}$ Gs), 因而也被称为反磁星[4].

通过分析超新星遗迹脉冲星的性质及分类, 有助于探索中子星的诞生、磁场的形成以及演化过程[51–56]. 对于研究中心致密天体、磁星和转动供能遗迹脉冲星的关系也具有重要意义. 此外, 年轻脉冲星在一定程度上保留了超新星爆发的信息, 因此其对超新星爆发过程也有一定的研究意义. 目前观测已发现近400颗超新星遗迹, 其中约1/4发现了脉冲星. 基于这些样本, 本文尝试分析年轻脉冲星自旋周期-磁场分类, 并探索不同类型年轻脉冲星的演化关系.

2 年轻脉冲星样本

本文收集了年轻脉冲星相关数据. 首先, 我们从超新星遗迹的在线目录[1](Supernova Remnants catalog, SNRcat), 澳大利亚国家望远镜设备中心[2](Australia Telescope National Facility, ATNF), McGill在线磁星目录[3](McGill Online Magnetar Catalog)和中心致密天体数据库[4]中收集了100颗遗迹脉冲星样本. 其次, 根据物理性质不同, 我们将这些遗迹脉冲星分为3类: 转动供能遗迹脉冲星(Rotation-powered SNR-PSR)、遗迹磁星(SNR-Magnetar, 内部供能)和CCO (内部供能)[2]. 接着, 我们从以上数据库收集了这些遗迹脉冲星的P、B、特征年龄(τ_{c})、τ_{SNR}等数据, 并在表1中列出了这些物理参数的平均值. 最后, 我们还从ATNF收集了其他脉冲星的相关数据, 并在图1展示了这些脉冲星的磁场强度-自旋周期分布, 其中还标出了3类遗迹脉冲星.

[1]http://snrcat.physics.umanitoba.ca/SNRtable.php
[2]http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/
[3]http://www.physics.mcgill.ca/pulsar/magnetar/main.html
[4]http://www.iasf-milano.inaf.it/deluca/cco/main.htm

表 1 超新星遗迹脉冲星物理性质

Table 1 Physical properties of the supernova remnant pulsars

SNR-PSR Type	Count	$\langle P\rangle^{a}$/s	$\langle B\rangle^{b}$/Gs	$\langle\tau_c\rangle^{c}$/yr	$\langle\tau_{SNR}\rangle^{d}$/yr
Rotation-powered SNR-PSR	83	2.0×10^{-1}	5.0×10^{12}	3.3×10^{5}	1.8×10^{4}
SNR-Magnetar	14	5.1	4.6×10^{14}	2.1×10^{4}	2.5×10^{4}
Central Compact Object	3	2.1×10^{-1}	5.3×10^{10}	2.3×10^{8}	6.2×10^{3}

[a] $\langle P\rangle$: the mean spin period.

[b] $\langle B\rangle$: the mean magnetic field strength.

[c] $\langle\tau_c\rangle$: the mean characteristic age.

[d] $\langle\tau_{SNR}\rangle$: the mean remnant age.

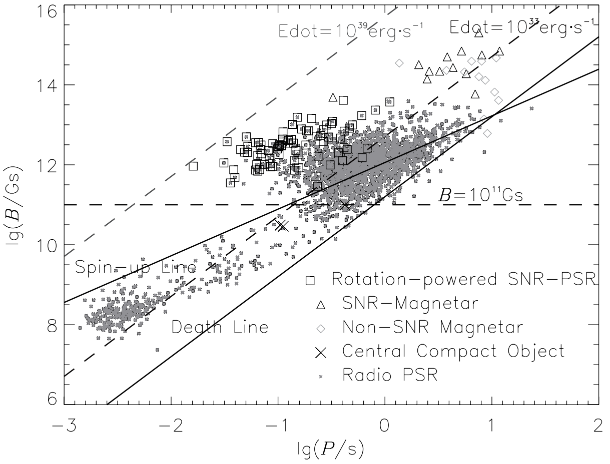

图 1 脉冲星磁场强度-自旋周期分布, 其中“Death Line”为脉冲星射电死亡线, “Spin-up Line”为爱丁顿吸积加速线, Edot表示$\dot{E}$.

Fig. 1 The distribution of the magnetic field strength versus spin period of the pulsars, where the “Death Line” is the radio death line of the pulsars, the “Spin-up Line” is the Eddington accretion spin-up line, and Edot represents $\dot{E}$.

3 年轻脉冲星物理性质分析

3.1 遗迹脉冲星自旋周期及磁场强度分布

我们尝试分析3类遗迹脉冲星的自旋周期及磁场强度分布.

首先, 转动供能遗迹脉冲星(83颗)、遗迹磁星(14颗)和中心致密天体(3颗)的自旋周期范围分别是$P\sim1.6\times10^{-2}-1.1$ s、$P\sim3.3\times10^{-1}-11.8$ s和$P\sim1.1\times10^{-1}-4.2\times10^{-1}$ s. 同时, 这3类遗迹脉冲星的表面磁场强度范围分别是$B\sim2.9\times10^{11}-4.1\times10^{13}$ Gs、$B\sim4.9\times10^{13}-2.0\times10^{15}$ Gs和$B\sim2.9\times10^{10}-9.8\times10^{10}$ Gs.

其次, 图2 (a)和图2 (b)分别显示了3类遗迹脉冲星的自旋周期和表面磁场强度分布. 从中可以看出, 转动供能遗迹脉冲星($\langle P\rangle\sim2.0\times10^{-1}$ s)与中心致密天体($\langle P\rangle\sim2.1\times10^{-1}$ s)具有相似的平均自转周期, 而遗迹磁星的平均自旋周期($\langle P\rangle\sim5.1$ s)比这两类源大近一个量级. 同时, 遗迹磁星的平均磁场强度($\langle B\rangle\sim4.6\times10^{14}$ Gs)比转动供能遗迹脉冲星($\langle B\rangle\sim5.0\times10^{12}$ Gs)高近2个量级, 而中心致密天体的平均磁场强度($\langle B\rangle\sim5.3\times10^{10}$ Gs)比转动供能遗迹脉冲星低约近2个量级.

最后, 我们用统计检验的方法分析了3类遗迹脉冲星的自旋周期及磁场强度分布. 其中, Anderson-Darling检验(A-D检验)以95%的概率判定, 转动供能遗迹脉冲星的自旋周期及磁场强度服从对数正态分布(A-D检验结果如表2所示), 表明该类遗迹脉冲星属于一类独立的源. 同时, Kolmogorov-Smirnov检验(K-S检验)以95%的概率判定, 转动供能遗迹脉冲星与中心致密天体具有相似的自旋周期分布, 但这两类源与遗迹磁星具有不同的自旋周期分布(K-S检验结果如表3所示). 同时, K-S检验以95%的概率判定这3类遗迹脉冲星之间有着不同的表面磁场强度分布(见表3).

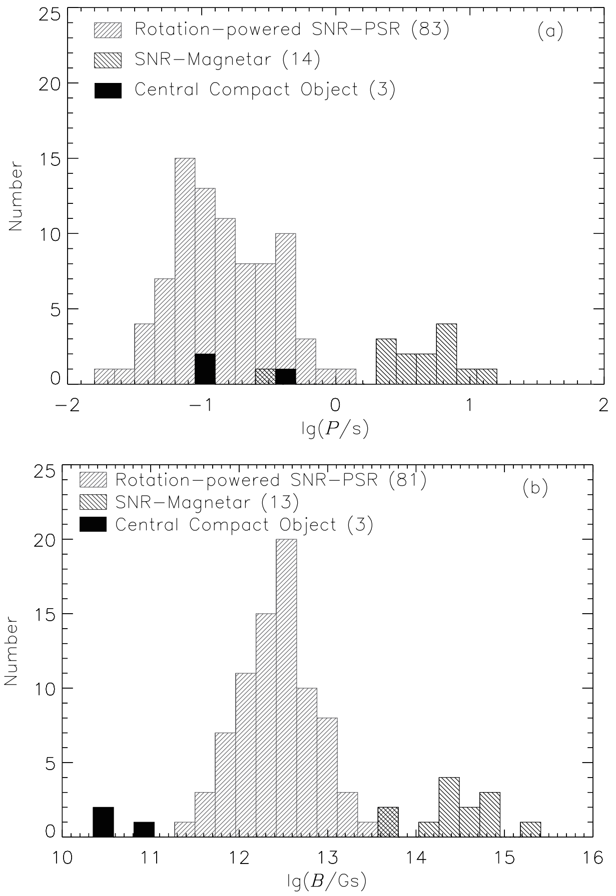

图 2 (a)超新星遗迹脉冲星自转周期分布. (b)超新星遗迹脉冲星磁场强度分布.

Fig. 2 (a) The spin period distribution of the supernova remnant pulsars. (b) The magnetic field strength distribution of the supernova remnant pulsars.

表 2 A-D检验结果

Table 2 A-D test results

Category	Count	p-value	Reject $H_0^{\rm a}$
	P		
Rotation-powered SNR-PSR	83	3.69×10^{-1}	No
	B		
Rotation-powered SNR-PSR	81	7.85×10^{-1}	No

[a] H_0 is the null hypothesis that the data follows a logormal distribution, where the confidence level parameter has a value of $\alpha=0.05$.

表 3 转动供能遗迹脉冲星与遗迹磁星的K-S检验结果

Table 3 K-S test results of rotation-powered SNR-PSR and SNR-Magnetar

Category	Count	p-value	Reject $H_0^{\rm a}$
	P		
Rotation-powered SNR-PSR	83	1.61×10^{-9}	Yes
SNR-Magnetar	14		
Rotation-powered SNR-PSR	83	5.89×10^{-1}	No
Central Compact Object	3		
SNR-Magnetar	14	1.07×10^{-2}	Yes
Central Compact Object	3		
	B		
Rotation-powered SNR-PSR	81	4.59×10^{-11}	Yes
SNR-Magnetar	13		
Rotation-powered SNR-PSR	81	1.60×10^{-3}	Yes
Central Compact Object	3		
SNR-Magnetar	13	4.30×10^{-3}	Yes
Central Compact Object	3		

[a] H_0 is the null hypothesis that the two sets of data come from the same continuous distribution, where the confidence level parameter has a value of $\alpha=0.05$.

3.2 特征年龄与遗迹年龄关系

通常理论认为, 脉冲星的前身星在经历超新星爆发后, 星体物质持续扩散的平均时标约为~ 300 kyr[15], 这暗示遗迹脉冲星是一类较年轻的源. 因此, 我们尝试分析遗迹脉冲星的年龄, 并参考其两种年龄估计方法, 即$\tau_{\rm c}$和$\tau_{\rm SNR}$.

首先, $\tau_{\rm c}$定义为:

$$\tau_{\rm c}=\frac{P}{2\dot{P}}\,, \tag{1}$$

其中$\dot{P}$为自旋周期导数.

我们统计发现, 转动供能遗迹脉冲星(83颗)、遗迹磁星(14颗)和中心致密天体(3颗)的特征年龄

范围分别是$\tau_c \sim 1.3\times10^3 - 1.1\times10^7$ yr、$\tau_c \sim 2.4\times10^2 - 2.3\times10^5$ yr和$\tau_c \sim 1.9\times10^8 - 3.0\times10^8$ yr. 同时, 这3类遗迹脉冲星的平均特征年龄分别是$\langle\tau_c\rangle \sim 3.3\times10^5$ yr、$\langle\tau_c\rangle \sim 2.1\times10^4$ yr和$\langle\tau_c\rangle \sim 2.3\times10^8$ yr. 其次, 值得注意的是, 利用(1)式计算特征年龄时, 需要假设脉冲星诞生时自旋速度远高于现在的自旋速度, 并且为偶极辐射减速, 制动指数n为3, 这就使得一些特殊脉冲星(如毫秒脉冲星)的特征年龄与真实年龄之间存在较大的误差[57]. 因此, 我们考虑了年轻脉冲星的另一种年龄估计方法. 一般认为脉冲星是由超新星爆发产生的, 所以与超新星遗迹成协的脉冲星的年龄应该与它相关的遗迹的年龄接近, 超新星遗迹年龄是根据遗迹膨胀速度来计算的. 我们从SNRcat数据库中收集了3类遗迹脉冲星的遗迹年龄. 其中, 转动供能遗迹脉冲星(83颗)、遗迹磁星(14颗)和中心致密天体(3颗)的遗迹年龄范围分别是$\tau_{\rm SNR} \sim 9.7\times10^2 - 1.4\times10^5$ yr、$\tau_{\rm SNR} \sim 1.4\times10^3 - 1.3\times10^5$ yr和$\tau_{\rm SNR} \sim 4.5\times10^3 - 7.0\times10^3$ yr. 同时, 这3类遗迹脉冲星的平均遗迹年龄分别是$\langle\tau_{\rm SNR}\rangle \sim 1.8\times10^4$ yr、$\langle\tau_{\rm SNR}\rangle \sim 2.5\times10^4$ yr和$\langle\tau_{\rm SNR}\rangle \sim 6.2\times10^3$ yr.

最后, 我们尝试比较遗迹脉冲星两种年龄的差异性. 为进一步比较遗迹脉冲星两种年龄关系, 我们将特征年龄与遗迹年龄之比定义为年龄比例参数:

$$R \equiv \frac{\tau_c}{\tau_{\rm SNR}}\,. \tag{2}$$

图3 (a)显示了3类遗迹脉冲星的特征年龄-遗迹年龄分布, 其中转动供能遗迹脉冲星和遗迹磁星两类源, 其特征年龄和遗迹年龄相差不大, 而中心致密天体的特征年龄明显高于其遗迹年龄. 图3 (b)显示了3类遗迹脉冲星年龄比例参数R的分布, 从图中可以看出中心致密天体的两种年龄估计值差距很大, 其特征年龄比遗迹年龄高了近10^4倍.

3.3 转动供能遗迹脉冲星与非遗迹年轻脉冲星

从图1中可以看出, 一些非遗迹脉冲星与遗迹脉冲星具有相似的磁场强度-自旋周期分布. 我们猜测这些非遗迹脉冲星也是年轻的源, 因而尝试比较其与遗迹脉冲星的物理性质. 首先, 我们只考虑转动供能脉冲星, 因而排除内部供能的磁星和中心致密天体. 其次, 考虑到转动供能遗迹脉冲星的自转能损率大多分布在$\dot{E} > 10^{33}\,{\rm erg\cdot s^{-1}}$范围内(见图1), 因此我们只选择$\dot{E} \sim 10^{33} - 10^{39}\,{\rm erg\cdot s^{-1}}$的非遗迹脉冲星. 再次, 考虑到吸积过程会影响脉冲星的自旋周期及磁场强度演化, 而通常理论认为吸积脉冲星大多分布在爱丁顿吸积加速线以下且具有较低的磁场强度, 因此我们排除磁场强度小于10^{11} Gs的脉冲星. 最后, 我们从ATNF数据库中收集了$\dot{E} \sim 10^{33} - 10^{39}\,{\rm erg\cdot s^{-1}}$且$B > 10^{11}$ Gs的转动供能遗迹脉冲星和非遗迹脉冲星的相关数据, 并进行比较.

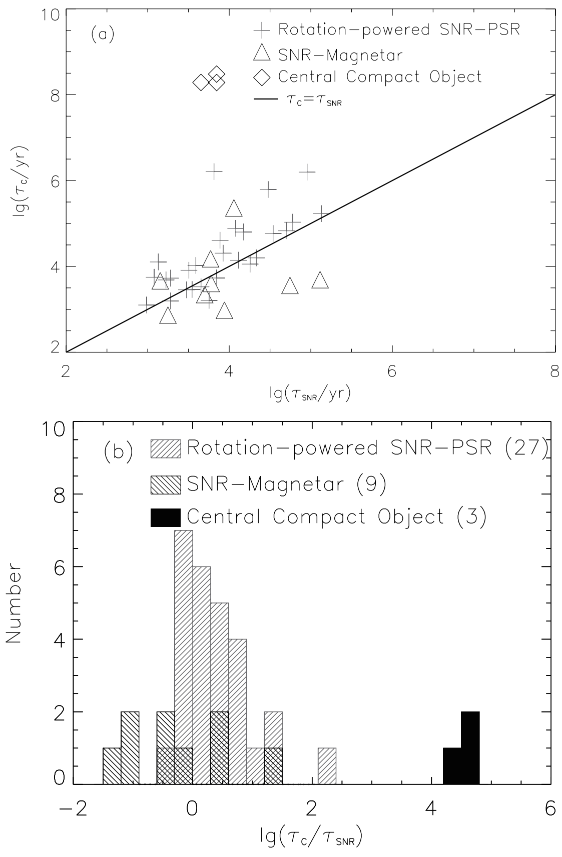

图 3 (a)超新星遗迹脉冲星特征年龄-遗迹年龄分布. (b)超新星遗迹脉冲星年龄比例参数$R \equiv \frac{\tau_c}{\tau_{\rm SNR}}$分布.

Fig. 3 (a) The distribution of the characteristic age versus remnant age of the the supernova remnant pulsars. (b) The distribution of the age ratio parameter $R \equiv \frac{\tau_c}{\tau_{\rm SNR}}$ of the supernova remnant pulsars.

图4 (a)、图4 (b)和图4 (c)分别显示了以上条件筛选到的遗迹脉冲星和非遗迹脉冲星的P、B和$\tau_{\rm c}$分布. 其中, 转动供能遗迹脉冲星$\langle P\rangle \sim 2.0\times 10^{-1}$ s、$\langle B\rangle \sim 5.0\times 10^{12}$ Gs和$\langle \tau_{\rm c}\rangle \sim 3.3\times 10^{5}$ yr, 而转动供能非遗迹脉冲星$\langle P\rangle \sim 4.0\times 10^{-1}$ s、$\langle B\rangle \sim 2.9\times 10^{12}$ Gs和$\langle \tau_{\rm c}\rangle \sim 1.5\times 10^{6}$ yr. 经K-S检验发现, 这两类脉冲星以95%的概率被判定具有不同的自旋周期、表面磁场强度和特征年龄分布(K-S检验结果如表4所示).

4 讨论与结论

本文分析了年轻脉冲星的物理性质并探索了其可能的分类及演化. 我们发现遗迹磁星的平均自旋周期和平均磁场强度明显高于转动供能遗迹脉冲星, 同时中心致密天体的平均磁场强度明显低于转动供能遗迹脉冲星, 因而猜测转动供能遗迹脉冲星与内部供能遗迹脉冲星可能有着不同的起源. 有观点认为中心致密天体可能起源于双星, 其中有学者在中心致密天体所在的超新星遗迹G353.6–0.7附近发现一颗后渐近巨星, 并猜测其与该中心致密天体起源于同一双星系统[58]. 考虑到中心致密天体的观测性质与宁静态的磁星相似, 因而也有观点认为中心致密天体可能是处于宁静态的磁星[4]. 关于磁星的起源, 有观点认为恒星经过引力塌缩会形成极强的磁星或是中子星诞生后磁场被放大[59–61]. 我们还进一步通过转动供能的遗迹脉冲星和非遗迹脉冲星有着不同的自旋周期、表面磁场强度和特征年龄分布, 推测转动供能的年轻孤立脉冲星演化伴随着自旋减速和磁场衰减. 具体的讨论和结论如下.

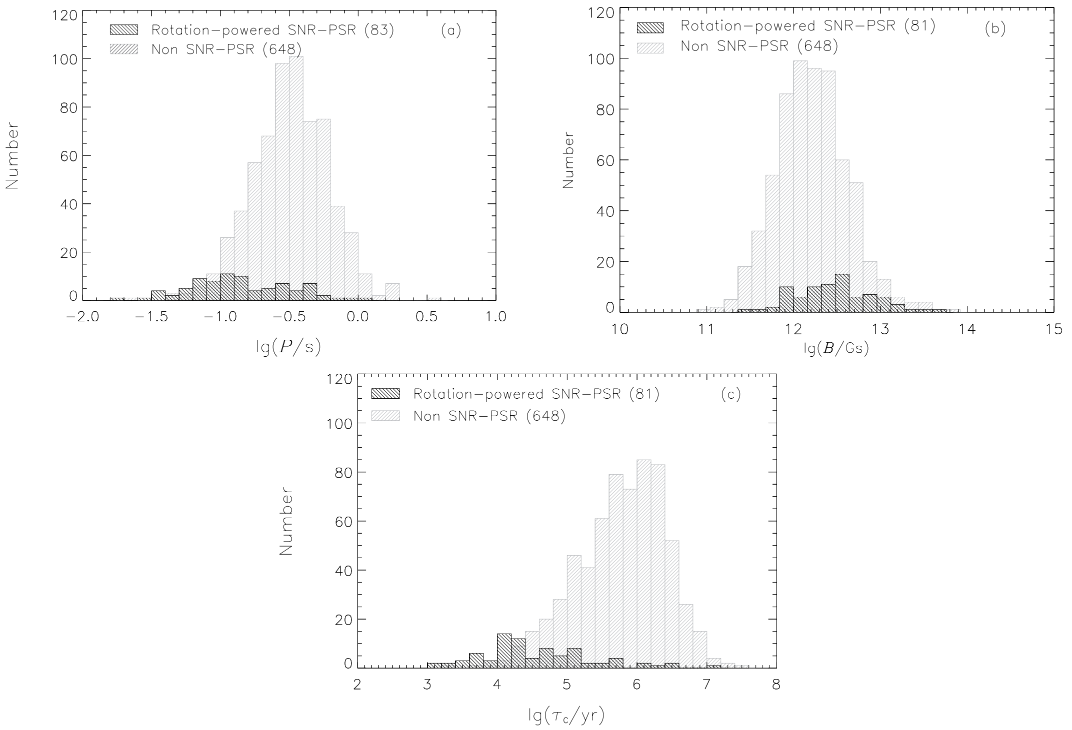

图 4 (a)转动供能的遗迹脉冲星和非遗迹脉冲星自旋周期分布. (b)转动供能的遗迹脉冲星和非遗迹脉冲星磁场强度分布. (c)转动供能的遗迹脉冲星和非遗迹脉冲星特征年龄分布. (注意: 图中只包含$\dot{E}\sim 10^{33}-10^{39}\,{\rm erg\cdot s^{-1}}$且$B>10^{11}$ Gs的转动供能脉冲星.)

Fig. 4 (a) The spin period distribution of the rotation-powered remnant and non-remnant pulsars. (b) The magnetic field strength distribution of the rotation-powered remnant and non-remnant pulsars. (c) The characteristic age distribution of the rotation-powered remnant and non-remnant pulsars. (Note: The figures only include the rotation-powered pulsars with $\dot{E}\sim 10^{33}-10^{39}\,{\rm erg\cdot s^{-1}}$ and $B>10^{11}$ Gs).

表 4 遗迹脉冲星和非遗迹脉冲星的K-S检验结果[a]

Table 4 K-S test results of SNR-PSR and non SNR-PSR

Category	Count	p-value	Reject H_0[b]
		P	
SNR-PSR	83	4.10×10^{-16}	Yes
Non SNR-PSR	648		
		B	
SNR-PSR	81	3.94×10^{-5}	Yes
Non SNR-PSR	648		
		$\tau_{\rm c}$	
SNR-PSR	81	9.29×10^{-27}	Yes
Non SNR-PSR	648		

[a] The sample contains only the rotating energy pulsars with $\dot{E}\sim10^{33}-10^{39}\,{\rm erg\cdot s^{-1}}$ and $B>10^{11}$ Gs.

[b] H_0 is the null hypothesis that the two sets of data come from the same continuous distribution, where the confidence level parameter has a value of $\alpha=0.05$.

(1)超新星遗迹脉冲星根据物理性质不同, 分为转动供能遗迹脉冲星、遗迹磁星和中心致密天体[4]. 首先, 转动供能遗迹脉冲星是一类$\tau_{\rm SNR}\sim10^4$ yr的年轻源, 其平均自旋周期及平均磁场强度分别是$\langle P\rangle\sim2.0\times10^{-1}$ s和$\langle B\rangle\sim5.0\times10^{12}$ Gs (见表1). 经A-D检验判定, 这类遗迹脉冲星的自旋周期和表面磁场强度均服从对数正态分布(见表2), 暗示它们是一类独立的源. 其次, K-S检验指出遗迹磁星和转动供能遗迹脉冲星有着不同的自旋周期及磁场强度分布, 而中心致密天体和转动供能遗迹脉冲星有着不同的磁场强度分布(见图2和表3). 这暗示转动供能和内部供能(磁星和中心致密天体)两类遗迹脉冲星属于不同类型的源, 而它们的差异性可能源于其不同的前身星或不同的超新星爆发过程, 也可能源于其中子星诞生后的不同演化过程. 通常理论认为, 中子星的形成可经由核塌缩超新星爆发或电子捕获超新星爆发[1], 其中$8-12\,M_\odot$的前身星主要发生电子捕获过程, $12-25\,M_\odot$的前身星主要发生铁核塌缩过程[15], 而中子星的质量范围是$1.4-3.2\,M_\odot$[62–66]. 因此, 我们猜测前身星的不同可能会导致中子星的质量、自旋周期以及磁场也会存在一定的差异性, 这两类超新星爆发过程可能会与两类遗迹脉冲星(转动供能和内部供能)有所关联. 事实上, 通常认为核塌缩中子星比电子捕获中子星具有更大的前身星质量[1, 15], 但这些猜想目前还没有相关的观测证据. 对于年轻脉冲星而言, 除PSR J1640-4631的制动指数n为3.15外[67], 其他源n都小于3. 一般认为, $n=3$代表偶极辐射, 因此我们猜测年轻脉冲星的辐射机制不仅仅是简单的偶极辐射, 此外可能还有粒子外流或星风制动[68–69].

(2)内部供能遗迹脉冲星(遗迹磁星和中心致密天体)与转动供能遗迹脉冲星相比, 具有明显不同的自旋周期及表面磁场强度分布. 首先, 遗迹磁星的平均自旋周期($\langle P\rangle\sim5.1$ s)比转动供能遗迹脉冲星($\langle P\rangle\sim2.0\times10^{-1}$ s)大近一个量级, 同时遗迹磁星的平均磁场强度($\langle B\rangle\sim4.6\times10^{14}$ Gs)比转动供能遗迹脉冲星($\langle B\rangle\sim5.0\times10^{12}$ Gs)高近两个量级(见表1和图2). 关于磁星磁场的形成, 根据化石场模型认为可能是前身星磁场的遗迹, 也有观点认为可能是由于后期磁流体的不稳定性或中微子加热周围物质形成对流放大了磁场[61]. 但最近一些低磁磁星的发现验证了磁星不一定具有很高的偶极磁场. 通常理论认为, 中子星的磁能$\propto B^2$, 而其偶极辐射功率$\propto B^2\Omega^4$, 其中$\Omega=2\pi/P$是脉冲星的自转角速度. 这暗示高磁场的遗迹磁星具有极强的磁能, 而强磁衰减会产生高能爆发, 即磁供能爆发现象. 同时, 高磁场遗迹磁星还具有较强的磁偶极辐射, 使得其具有较强的磁制动率及较大的自旋周期导数, 即$\dot{P}\sim10^{-11}{\rm s\cdot s^{-1}}$. 这使得遗迹磁星能在$\sim10^4$ yr时间里, 从初始周期$P_0\sim100$ ms, 经磁制动减速至$P\sim10$ s. 其次, 中心致密天体的平均自旋周期($\langle P\rangle\sim2.1\times10^{-1}$ s)和转动供能遗迹脉冲星($\langle P\rangle\sim2.0\times10^{-1}$ s)相似, 但其平均磁场强度($\langle B\rangle\sim5.3\times10^{10}$ Gs)比转动供能遗迹脉冲星($\langle B\rangle\sim5.0\times10^{12}$ Gs)低近两个量级(见表1和图2). 中心致密天体作为内部供能脉冲星, 其低磁场起源一直是学术界争论的热点问题. 有观点认为其诞生时磁场就这么弱, 也有观点认为是中子星诞生后磁场的衰减形成的[2], 还有一种观点认为是其

前身星抛出的物质可能回落至中子星表面并掩埋其磁场, 从而形成低磁场的中心致密天体, 数万年后其表面的磁场会恢复到原来的水平[70]. 但这些理论仍需进一步解释中心致密天体的黑体辐射等现象以及X辐射能量来源等问题.

(3)通常理论认为, 超新星爆发时, 中子星会获得很大的反冲速度(或逃逸速度), 使其可能会逃离所在的超新星遗迹[22]. 这暗示一些非遗迹脉冲星可能也是年轻的源, 只是它们逃逸速度较大而早已脱离所在的超新星遗迹, 而这些逃离遗迹的脉冲星可能与遗迹脉冲星有着相似的自旋周期、表面磁场强度和特征年龄分布. 但是, 从图4可以看出, 在$\dot{E} \sim 10^{33} - 10^{39}\,\mathrm{erg \cdot s^{-1}}$且$B > 10^{11}$ Gs范围内转动供能的遗迹脉冲星($\langle P \rangle \sim 2.0 \times 10^{-1}$ s, $\langle B \rangle \sim 5.0 \times 10^{12}$ Gs, $\langle \tau_{\rm c} \rangle \sim 3.3 \times 10^{5}$ yr)与非遗迹脉冲星($\langle P \rangle \sim 4.0 \times 10^{-1}$ s, $\langle B \rangle \sim 2.9 \times 10^{12}$ Gs, $\langle \tau_{\rm c} \rangle \sim 1.5 \times 10^{6}$ yr)相比, 具有更快的平均自旋周期, 更大的平均表面磁场强度和更短的平均特征年龄. 同时, K-S检验指出, 这两类脉冲星的自旋周期、表面磁场强度和特征年龄来自不同分布(见表4). 这暗示在$\dot{E} \sim 10^{33} - 10^{39}\,\mathrm{erg \cdot s^{-1}}$且$B > 10^{11}$ Gs的转动供能非遗迹脉冲星, 可能既包含一些逃离遗迹的年轻脉冲星, 又包含了一些经过演化的年老脉冲星. 其中, 这些年老的脉冲星经过$\gtrsim 30$ kyr的演化, 其超新星遗迹密度逐渐扩散至接近银河系平均密度时, 便难以观测到超新星遗迹, 即变为非遗迹脉冲星. 此时, 这些年老的脉冲星与年轻的遗迹脉冲星相比, 平均自旋周期大了近一倍($\langle P \rangle \sim 4.0 \times 10^{-1}$ s (年老的遗迹脉冲星), $\langle P \rangle \sim 2.0 \times 10^{-1}$ s (年轻的遗迹脉冲星)), 平均磁场强度低了近一半($\langle B \rangle \sim 2.9 \times 10^{12}$ Gs (年老的遗迹脉冲星), $\langle B \rangle \sim 5.0 \times 10^{12}$ Gs (年轻的遗迹脉冲星)), 而平均特征年龄大了$\sim 10^{6}$ yr ($\langle \tau_{\rm c} \rangle \sim 1.5 \times 10^{6}$ yr (年老的遗迹脉冲星), $\langle \tau_{\rm c} \rangle \sim 3.3 \times 10^{5}$ yr (年轻的遗迹脉冲星)). 这暗示中子星诞生后经时间$\sim 10^{5} - 10^{6}$ yr的演化, 其自旋速度将减小近一半, 同时其磁场强度也将衰减近一半, 其中磁场的衰减可能源于欧姆耗散等物理过程[1].

参考文献

[1] Alsabti A W, Murdin P. Handbook of Supernovae. Berlin: Springer International Publishing, 2017: 1-373
[2] 王双强, 王娜, 张承民, 等. 天文学进展, 2018, 36: 1
[3] Janka H T. Annual Review of Nuclear & Particle Science, 2012, 62: 407
[4] 张承民, 王培, 杨佚沿. 科技导报, 2017, 35: 12
[5] Staelin D H, Reifenstein E C III. Science, 1968, 162: 1481
[6] Large M I, Vaughan A E, Wielebinski R. Nature, 1968, 220: 753
[7] Page D, Beznogov M V, Garibay I, et al. ApJ, 2020, 898: 125
[8] Greco E, Miceli M, Orlando S, et al. ApJ, 2021, 908: L45
[9] Soker N. NewA, 2021, 84: 101548
[10] Ferrand G, Safi-Harb S. AdSpR, 2012, 49: 1313
[11] Manchester R N, Hobbs G B, Teoh A, et al. AJ, 2005, 129: 1993
[12] Peng B, Nan R, Su Y, et al. Ap&SS, 2001, 278: 219
[13] Li D, Wang P, Qian L, et al. IMMag, 2018, 19: 112
[14] Nan R. ScChG, 2006, 49: 129
[15] Cui X H, Zhang C M, Li D, et al. MNRAS, 2021, 508: 279
[16] Radhakrishnan V, Srinivasan G. JApA, 1980, 1: 25
[17] Srinivasan G, Bhattacharya D, Dwarakanath K S. JA&A, 1984, 5: 403
[18] Manchester R N. A&A, 1987, 171: 205
[19] Narayan R, Schaudt K J. ApJ, 1988, 325: L43
[20] Stollman G M. A&A, 1987, 178: 143
[21] Lorimer D R, Bailes M, Dewey R J, et al. MNRAS, 1993, 263: 403
[22] Frail D A, Goss W M, Whiteoak J B Z. ApJ, 1994, 437: 781
[23] Hurley K. Soft Gamma-ray Repeaters and Magnetars. Neutron Stars and Pulsars. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009: 575-588
[24] Olausen S A, Kaspi V M. ApJ, 2014, 212: 6
[25] Thompson C, Duncan R C. MNRAS, 1995, 275: 225
[26] Thompson C, Duncan R C. ApJ, 1996, 473, 322
[27] Duncan R C, Thompson C. ApJ, 1992, 392: L9
[28] Mereghetti S, Pons J A, Melatos A. SSRv, 2015, 191: 315
[29] Esposito P, Rea N, Israel G L. Magnetars: A Short Review and Some Sparse Considerations//Belloni T M, Méndez M, Zhang C M. Timing Neutron Stars: Pulsations Oscillations and Explosions. Berlin, Heidelberg: Springer, 2021: 97-142
[30] Borghese A. Italian Journal of Animal Science, 2019, 90: 204
[31] Rea N, Esposito P. Magnetar Outbursts: An Observational Review//Torres D F, Rea N. High-Energy Emission from Pulsars and Their Systems. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011: 247-273

[32] Turolla R, Zane S, Watts A L. RPPh, 2015, 78: 116901
[33] Rea N, Israel G L, Pons J A, et al. ApJ, 2013, 770: 65
[34] Rea N, Viganò D, Israel G L, et al. ApJ, 2014, 781: L17
[35] Viganò D, Rea N,Pons J A, et al. MNRAS, 2013, 434: 123
[36] Pavlov G G, Zavlin V E, Aschenbach B, et al. ApJ, 2000, 531: L53
[37] Pavlov G G, Sanwal D, Garmire G P, et al. Astronomical Society of the Pacific Conference Series. San Francisco: ASP, 2002, 271: 247
[38] Mereghetti S. X-ray Emission from Isolated Neutron Stars. High-Energy Emission from Pulsars and Their Systems. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011: 345-363
[39] Pavlov G G, Sanwal D, Teter M A. Young Neutron Stars and Their Environments. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2004, 218: 239
[40] Ho W C G. Neutron Stars and Pulsars: Challenges and Opportunities after 80 years. Cambridge: Cambridge University Press, 2013, 291: 101
[41] Gotthelf E V, Halpern J P. ApJ, 2009, 695: L35
[42] Hui C Y, Becker W. A&A, 2006, 454: 543
[43] Zavlin V E, Pavlov G G, Sanwal D, et al. ApJ, 2000, 540: L25
[44] Mereghetti S, De Luca A, Caraveo P A, et al. ApJ, 2002, 581: 1280
[45] Bignami G F, Caraveo P A, De Luca A, et al. Nature, 2003, 423: 725
[46] De Luca A, Mereghetti S, Caraveo P A, et al. A&A, 2004, 418: 625
[47] Gotthelf E V, Halpern J P. ApJ, 2007, 664: L35
[48] Gotthelf E V, Halpern J P, Seward F D. ApJ, 2005, 627: 390
[49] Seward F D, Slane P O, Smith R K, et al. ApJ, 2003, 584: 414
[50] Halpern J P, Gotthelf E V, Camilo F, et al. ApJ, 2007, 665: 1304
[51] Janka H T. Young Neutron Stars and Their Environments. San Francisco: IAU SYMP, 2004, 218: 3
[52] Faucher-Giguère C A, Kaspi V M. American Institute of Physics Conference Series, Berlin: Springer Nature, 2008, 983: 607
[53] Kalogera V, Valsecchi F, Willems B. American Institute of Physics Conference Series, Berlin: Springer Nature, 2008, 983: 433
[54] McLaughlin M A, Lorimer D R, Lyne A G, et al. Young Neutron Stars and Their Environments. San Francisco: IAU SYMP, 2004, 218: 255
[55] Noro A, Miyaji S, Yamashita K, et al. Young Neutron Stars and Their Environments. San Francisco: IAU SYMP, 2004, 218: 37
[56] Spruit H C. American Institute of Physics Conference Series, Berlin: Springer Nature, 2008, 983: 391
[57] Jiang L, Zhang C M, Tanni A, et al. International Journal of Modern Physics: Conference Series, 2013, 23: 95
[58] Doroshenko V, Pühlhofer G, Kavanagh P, et al. MNRAS, 2016, 485: 2565
[59] Igoshev A P, Popov S B, Hollerbach R. Univ, 2021, 7: 351
[60] Pétri J. MNRAS, 2019, 485: 4573
[61] Ferrario L,Wickramasinghe D. MNRAS, 2008, 389: L66
[62] Thomas E R, Anna L W, Paul S R, et al. ApJ, 2021, 918: L27
[63] Zhang C M, Wang J, Zhao Y H, et al. A&A, 2011, 527: A83
[64] Miller M C, Lamb F K, Dittmann A J, et al. ApJ, 2019, 887: L24
[65] Riley T E, Watts A L, Bogdanov S, et al. ApJ, 2019, 887: L21
[66] Miller M C. Astrophysical Constraints on Dense Matter in Neutron Stars. Timing Neutron Stars: Pulsations, Oscillations and Explosions. Berlin, Heidelberg: Springer, 2021: 1-51
[67] Shi H, Hu H W, Chen W C. PASJ, 2019, 71: L5
[68] Cheng K S. Astrophysics and Space Science Library. Berlin Heidelberg: Springer, 2009, 357: 481
[69] Pétri J. MNRAS, 2020, 499: 4445
[70] Luo J, Ng C Y, Ho W C G, et al. ApJ, 2015, 808: 130

Period-magnetic Field Classification and Evolution of the Young Pulsars

YU Jing WANG De-hua SUN Yi-hong ZHOU Yun-gang
(School of Physics and Electronic Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025)

Abstract The young pulsars mostly locate in the supernova remnants, which can be classified as the rotation-powered pulsars, magnetars and central compact objects, and these three types of young pulsars share the different distributions of the spin periods and magnetic field strengths. The remnant magnetars share the average spin period larger than the rotation-powered remnant pulsars by nearly one order of magnitude, while their average magnetic field strength is higher than that of the rotation-powered remnant pulsars by about two orders of magnitude. Meanwhile, the central compact objects share the average magnetic field strength lower than the rotation-powered remnant pulsars by about two orders of magnitude. The different physical properties of these three types of young pulsars may originate from their different predecessors, or their different supernova processes, and may also originate from their different evolutional processes after the neutron stars were born. Furthermore, the rotation-powered remnant pulsars exhibit the faster average spin period, the higher average magnetic field strength, and the shorter average characteristic age than the young rotation-powered non-remnant pulsars. This implies that when the new born neutron star undergos the evolution process with the timescale of $\tau \sim 10^5 - 10^6$ yr, its spin velocity will decrease by about a half, and its magnetic field strength will also decrease by about a half simultaneously.

Key words pulsars: general, stars: neutron, supernova remnants